

ПОЖАРНАЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ [05.26.03, ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ]

УДК 624.014; 624.047.2; 699.814
doi: 10.34987/vestnik.sibpsa.2021.98.79.001

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ОГНЕСТОЙКОСТИ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРОСТРАНСТВЕННОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КАРКАСА

*Голдобина Л.А. д.т.н., профессор, Козлов Д.Ю.
ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России*

Аннотация. Металлические конструкции, как известно, обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с другими строительными материалами, используемыми в несущих и ограждающих конструкциях, а именно: небольшой вес, унификация изделий, удобство и скорость возведения каркасов непосредственно на площадке строительства и рядом других. Однако, им присущи и недостатки: низкие коррозионная стойкость и огнестойкость конструкций.

На стадии проектирования несущих металлических конструкций зданий и сооружений необходимо не только обеспечить их прочность, устойчивость и геометрическую неизменяемость при работе объекта в обычных условиях эксплуатации, но обосновать сохранение этих свойств при воздействии на здание высоких температур во время пожара, задав строительным конструкциям пределы огнестойкости, соответствующие огнестойкости проектируемого объекта.

Известные методы оценки огнестойкости стальных конструкций и нормируемые показатели пределов огнестойкости не всегда дают однозначный ответ. В связи с этими обстоятельствами в статье предлагаются к рассмотрению результаты сравнительного анализа способов оценки огнестойкости стропильной фермы рамно-связевого металлического каркаса.

Ключевые слова: степень огнестойкости зданий; огнестойкость строительных конструкций; несущая способность; методы оценки огнестойкости строительных конструкций.

TO THE QUESTION OF ESTIMATING THE FIRE RESISTANCE OF THE BEARING SPACE CONSTRUCTIONS METAL FRAME

*Goldobina L.A. Holder of an Advanced Doctorate (Doctor of Science) in Engineering Sciences,
Full Professor, Kozlov D.Yu.*

FSBEE HE Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia

Annotation. Metal structures, as you know, have a number of advantages over other building materials used in load-bearing and enclosing structures, namely: low weight, unification of products, convenience and speed of erection of frames directly on the site and next to others. However, they also have disadvantages: low corrosion resistance and fire resistance of structures.

At the design stage of load-bearing metal structures of buildings and structures, it is necessary not only to ensure their strength, stability and geometric invariability during the operation of the object under

normal operating conditions, but to justify the preservation of these properties when the building is exposed to high temperatures during a fire by setting the building structures fire resistance limits corresponding to the fire resistance of the designed object.

The known methods for assessing the fire resistance of steel structures and the standardized indicators of the fire resistance limits do not always give an unambiguous answer. In connection with these circumstances, the article proposes to consider the results of a comparative analysis of methods for assessing the fire resistance of a truss truss of a frame-bonded metal frame.

Key words: the degree of fire resistance of buildings; fire resistance of building structures; load bearing capacity; methods for assessing the fire resistance of building structures.

В настоящее время в России и за рубежом весьма эффективным направлением в строительстве является применение металлических конструкций в зданиях любого назначения. Преимущество зданий, возводимых с несущим металлическим каркасом, очевидно: высокая прочность, легкость и долговечность металлических конструкций; типизация и унификация конструкций, узлов и деталей; высокая технологичность и относительно легкая транспортировка металлических конструкций; высокая скорость монтажа и степень заводской готовности.

Однако область применения металлических конструкций несмотря на известные эффективные методы повышения огнестойкости ограничена в отечественном строительстве из-за недостаточной их пожарной безопасности [1].

Под действием высоких температур при пожаре несущие металлические конструкции (фермы, балки, колонны) деформируются, теряют прочность и устойчивость, что приводит к разрушению отдельных элементов и (или) здания в целом.

Среди металлических конструкций менее стойкими к тепловому воздействию являются строительные фермы, поскольку они обладают относительно низким коэффициентом их надежности и наличием большого числа элементов и стыков, отказ каждого из которых приводит к разрушению всей конструкции [2].

Необходимость в определении показателей огнестойкости стальных ферм возникает при строительстве или реконструкции здания, а также при усилении его частей и элементов, приведении огнестойкости стальных ферм в соответствие с требованиями современных строительных норм, при проведении экспертизы и (или) восстановлении конструкций здания после пожара.

Потеря несущей способности и устойчивости одной или нескольких ферм ставит под вопрос существование всего здания в целом [3].

В соответствии со статьей 87 «Федерального закона от 22.07.2008 N 123-ФЗ (ред. от 30.04.2021) "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» пределы огнестойкости должны определяться в условиях стандартных испытаний по методикам, установленным нормативными документами по пожарной безопасности. Кроме того, пределы огнестойкости и классы пожарной опасности строительных конструкций, аналогичных по форме, материалам, конструктивному исполнению строительным конструкциям, прошедшим огневые испытания, могут определяться расчетно-аналитическим методом, установленным нормативными документами по пожарной безопасности [4].

Совместный анализ документов (ФЗ № 123, ГОСТ 30247.0 и ГОСТ 30247.1 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость», СП 2.13130.2020 «Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты» [4, 5, 6, 7]) показывает, что в этих документах нет ни самих методик, ни ссылок на них [8].

Известные способы оценки огнестойкости стальных ферм здания состоят в изучении результатов последствий натурного пожара: определение положения конструкции в здании и оценка ее состояния посредством осмотра и измерения; определение времени наступления предельного состояния по потере несущей способности конструкции. В связи с различиями теплового режима натурного и стандартного пожаров затруднено определение истинных значений

пределов огнестойкости конструкций, при этом причины разрушения стальных ферм фрагмента могут быть не установлены вследствие многообразия одновременно действующих факторов пожара.

Представляет определенные трудности и сопоставление полученных результатов со стандартными огневыми испытаниями аналогичных конструкций.

Кроме того, натурные испытания связаны с существенными финансовыми затратами, возможностью обеспечения безопасности участникам эксперимента [9,10].

Наиболее предпочтительными остаются способы оценки огнестойкости стальных ферм здания путем неразрушающих испытаний, включающего проведение технического осмотра, установление сортамента и марки стали, выявление условия опирания и крепления концов стальных ферм, определение времени наступления предельного состояния по признаку потери несущей способности конструкции под испытательной нагрузкой в условиях стандартного теплового воздействия [7] или определение огнестойкости стальной фермы путем аналитических расчетов [11, 12, 13].

Представляет интерес способ оценки огнестойкости стальной фермы [14], сущность которого состоит в том, что оценку огнестойкости стальной фермы проводят без натурального огневого воздействия, используя комплекс единичных показателей качества стальных конструкций, влияющих на их огнестойкость, а именно: геометрические характеристики поперечного сечения; условия закрепления концов элементов стальной фермы; периметр обогрева поперечного сечения; нормативное сопротивление стали при сжатии и растяжении по пределу текучести; значение нагрузки на ферму и схема ее приложения; продольное усилие в стержнях; интенсивность нормативных силовых напряжений в металле в опасных сечениях элементов стальной фермы.

При этом назначается число и место расположения участков, для которых определяются единичные показатели качества.

После чего при известных показателях качества определяются интегральные конструктивные параметры: интенсивность нормальных силовых напряжений в поперечном сечении элементов стальной фермы в условиях оценочного огневого испытания; приведенная толщина металла поперечного сечения элементов стальной фермы; проектное время сопротивления термосиловому воздействию каждого элемента стальной фермы по потере несущей способности.

Авторами статьи были проанализированы результаты оценки огнестойкости несущих элементов стропильной фермы, полученные двумя известными способами.

В качестве объекта исследования была рассмотрена стальная стропильная ферма пространственного каркаса складского комплекса "СВМ-Терминал" (Ленинградская обл., Всеволожский р-н, пос. Новосаратовка), с габаритными размерами в плане в осях 110,0 x 57,9 (м) (рис. 1).

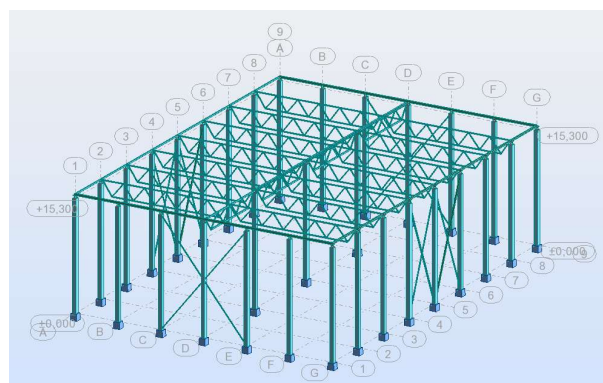


Рис. 1. Аналитическая модель пространственного каркаса, созданная в RSA

Складское здание с металлическим рамно-связевым каркасом имеет II степень огнестойкости, класс конструктивной пожарной опасности здания - С0, класс функциональной пожарной опасности здания – Ф5.2. Здание разделено на три одинаковых корпуса противопожарными перегородками из сэндвич-панелей Terplant толщиной 120 мм, EI150.

Стропильная ферма представляет собой решетчатую конструкцию, воспринимающую нагрузки от кровельного покрытия, перекрывающая поперечный 18-ти метровый пролет здания и опирающаяся на несущие стальные колонны (рис. 2).

Выбор фермы трапециевидального очертания не случаен, поскольку по сравнению с треугольными, такие фермы имеют преимущества в более простой конструкции узлов, а также позволяют сконструировать жесткий рамный узел, что повышает жесткость всего каркаса здания. Решетки таких ферм не имеют длинных стержней в середине пролета, и своей формой ближе к очертанию эпюры моментов.

Конструктивным решением, позволяющим снизить массу, трудоемкость изготовления и монтажа металлоконструкций, является применение в конструкции стропильных ферм прямоугольных гнутозамкнутых профилей, значительным преимуществом которых является их равноустойчивость в двух плоскостях, хорошая обтекаемость, удобство окраски и стойкость против коррозии.

Стропильная ферма представляет собой плоскую шарнирно-стержневую систему, пояса и раскосы которой выполнены из стали марки С255 ГОСТ 27772-88 [15]: верхний (сжатый) и нижний (растянутый) пояса – гнутый профиль квадратного сечения 120x120x5; раскосы сжатые и растянутые - 100x100x4, 100x100x5, 100x100x6 (рис. 3).

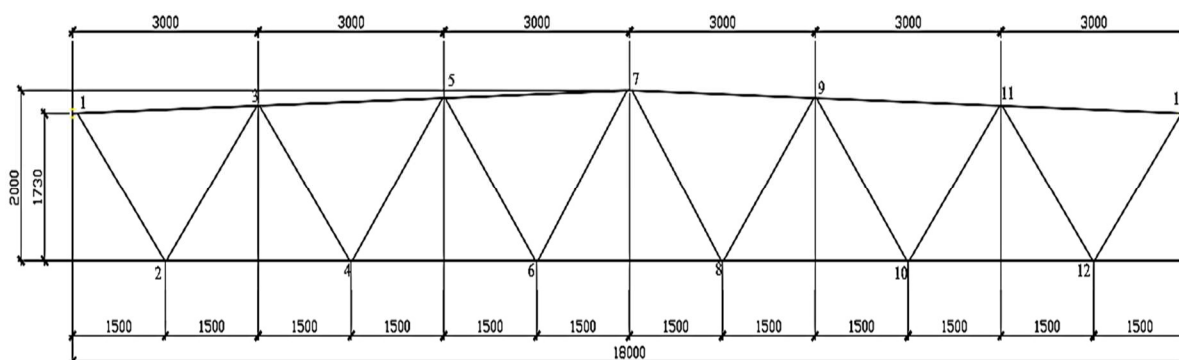


Рис. 2. Конструктивная схема стропильной фермы

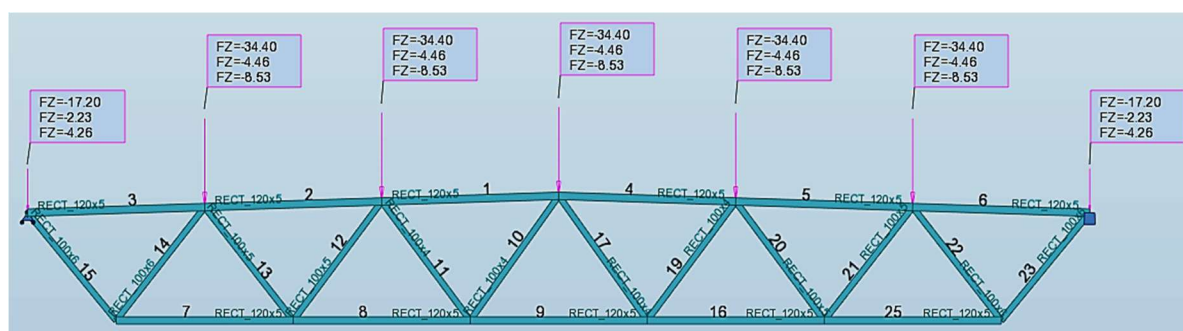


Рис. 3. Расчетная модель стропильной фермы
(задание нагрузок: приложение сосредоточенной нагрузки в узлах фермы)

Исходные данные для расчета стропильной фермы представлены в табл. 1.

Статический расчёт стропильной фермы методом конечных элементов (МКЭ) был выполнен в программном комплексе Robot Structural Analysis Professional (RSA) на основе ее

сгенерированной аналитической модели с заданными геометрическими характеристиками (габаритные размеры и размеры сечений) и нагрузками (рис. 4).

Таблица 1. Сбор нагрузок на стропильную ферму

Позиция	Наименование нагрузки	Нормативная нагрузка, кН/м	Коэффициент надёжности по нагрузке, γ_n	Расчётная нагрузка, кН/м
1	Собственный вес стропильной фермы	0,520	1,05	0,546
2	Профлист	0,159	1,05	0,167
	Пароизоляция	0,007	1,3	0,091
	Утеплитель 0,1м $\gamma=1,25$ кН/м ³	0,122	1,3	0,160
	Утеплитель 0,04 м $\gamma=1,85$ кН/м ³	0,074	1,3	0,096
	ПВХ мембрана	0,020	1,3	0,026
3	Нагрузка от оборудования на кровле	0,222	1,1	0,244
4	Снеговая нагрузка	1,260	1,4	1,764
	Всего:	2,384	-	3,094

Результаты расчета, необходимые в дальнейшем для оценки предела огнестойкости ферменной конструкции, представлены на рис. 4, 5, соответственно, продольными усилиями и напряжениями в стержнях.

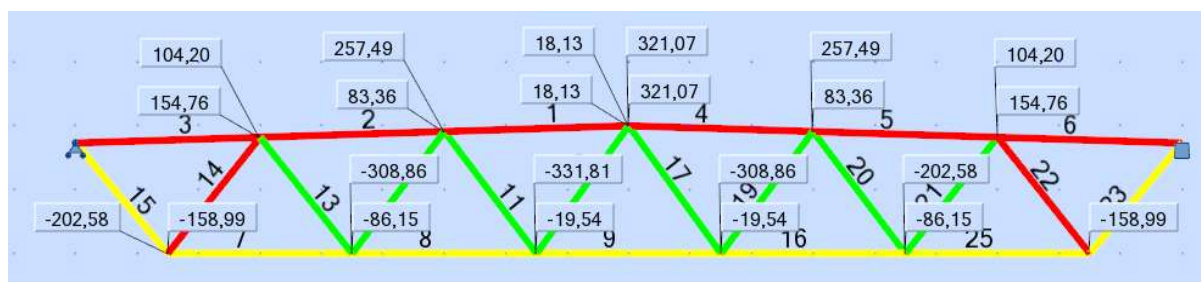


Рис. 4. Значения продольных усилий в стержнях стропильной фермы

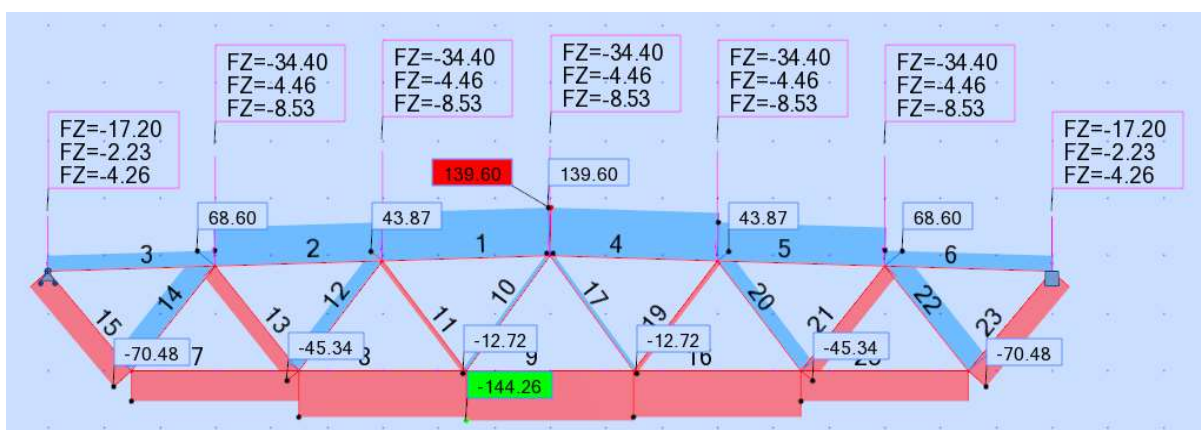


Рис. 5. Значения напряжений в стержнях стропильной фермы

В программно-вычислительном комплексе RSA была выполнена проверка принятых для расчета сечений стержней, которая показала, что они удовлетворяют заданным нагрузкам и могут быть в дальнейшем использованы при конструировании стропильной фермы.

Достоверность результатов статического расчета МКЭ, выполненного в программно-вычислительном комплексе Robot Structural Analysis Professional (RSA), подтверждается

процедурами верификации (результаты, полученные на основании математической и численной модели стропильной фермы вполне согласуются) и валидации (принятая расчетная модель стропильной фермы соответствует реальному физическому объекту, в частности, основные размеры конечно-элементной модели (КЭМ) фермы согласуются с ее физическими размерами; свойства материала, заданные в модели, соответствуют используемым в проекте; нагрузки, приложенные к конструкции, соответствуют по значениям и месту приложения методике расчета подобных конструкций; типы связей соответствуют шарнирно-опертой по обоим концам балки.

В соответствии с предлагаемым способом оценки огнестойкости стропильной фермы необходимо определиться с числом и местом расположения участков, для которых находят показатели качества элементов стальной фермы.

Вероятно, наиболее опасными являются узлы с наибольшими перемещениями, вызванными деформациями стержней в силу воспринимаемых нагрузок (рис. 6).

При воздействии высоких температур деформации возрастут, а поэтому, есть основания провести оценку предела огнестойкости стержней, сходящихся в таком узле, а также стержней стальной фермы с наибольшими значениями продольных усилий (рис. 3, табл. 2).

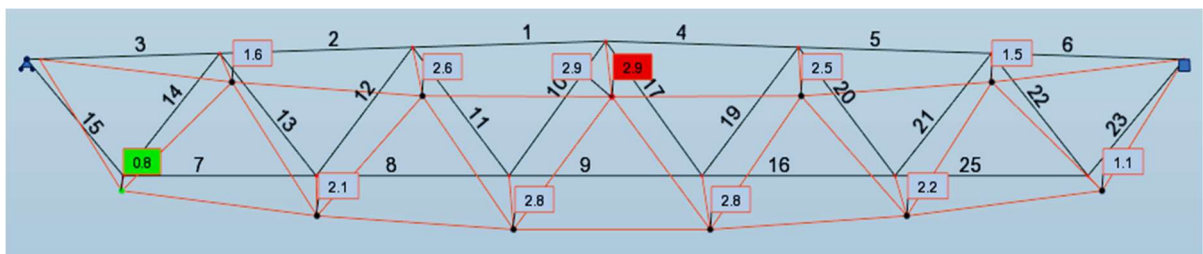


Рис. 6. Значения перемещений узлов, вызванных деформацией стержней

На основании известной методики определения предела огнестойкости элементов фермы [11, 12, 13] был выполнен следующий расчет.

Определение предела огнестойкости по потере прочности:

- определение усилий в наиболее нагруженных стержнях фермы от нормативной нагрузки $N_{n,i}$ при известных значениях расчетных значений, полученных в RSA (рис. 3):

$$N_{n,i} = \frac{N_i}{\gamma_f},$$

где N_i - расчетная продольная нагрузка в i -том стержне, кН; γ_f - коэффициент надежности по материалу;

- определение коэффициентов изменения предела текучести стали $\gamma_{t,i}$, соответствующих критической температуре нагрева стержней фермы:

$$\gamma_{t,i} = \frac{N_{n,i}}{A_{s,i} \cdot R_{yn}},$$

где N_n - нормативная продольная нагрузка в i -том стержне, кН; $A_{s,i}$ - площадь поперечного сечения элемента фермы, m^2 ; R_{yn} - нормативное сопротивление стали растяжению (сжатию), кПа;

- определение значения критической температуры $t_{cr,i}$ по известным графикам [11, 12, 13] или аналитически в зависимости от величины $\gamma_{t,i}$, при $\gamma_{t,i} \leq 0,6$:

$$t_{cr,i} = 750 - 440 \cdot \gamma_{t,i},$$

где $\gamma_{t,i}$ - коэффициент изменения предела текучести стали, соответствующий критической температуре нагрева i -го элемента;

- определение толщины профиля элемента фермы, приведенного к толщине пластины, $t_{пр,i}$:

$$t_{пр,i} = \frac{A_{s,i}}{P_i},$$

где $A_{s,i}$ – площадь профиля элемента, см²; P_i – периметр обогреваемых сторон элемента, см;

- определение по известным графикам [11, 12, 13] предела огнестойкости $P_{ф,i}$ стержней фермы.

Определение предела огнестойкости по потере устойчивости сжатых элементов фермы:

- определение максимальной гибкости $\lambda_{max,i}$ стержня при известных геометрических характеристиках стержней, заданных геометрией стропильной фермы и ее сечениями:

$$\lambda_{max,i} = \frac{l_{0,i}}{i_{min,i}},$$

где $l_{0,i}$ – приведенная длина i -го стержня фермы, см; i_{min} – радиус инерции сечения i -го стержня фермы, см;

- определение напряжения $\sigma_{n,i}$ от нормативной нагрузки в i -том стержне фермы:

$$\sigma_{n,i} = \frac{N_{n,i}}{A_{s,i}};$$

- определение критической разности краевых деформаций $\Delta \varepsilon_{n,i}$:

$$\Delta \varepsilon_{n,i} = \frac{\pi^2}{\lambda_{max,i}^2} - \frac{\sigma_{n,i}}{E},$$

где $\lambda_{max,i}$ – максимальная гибкость i -го стержня; $\sigma_{n,i}$ – нормативное напряжение в i -том стержне, МПа; $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа – модуль упругости стали;

- определение критической температуры $t_{cr,i}$ в i -том стержне фермы по графику;

- определение фактического предела огнестойкости $P_{ф,i}$ i -го стержня фермы по графику.

Результаты расчетов приведены в табл. 2, 3.

Таблица 2. Данные определения предела огнестойкости элементов стропильной фермы по потере прочности

Элементы стальной фермы	Исходные данные				Результаты расчета			
	l_i , см	$N_{n,i}$, кН	$A_{s,i}$, см ²	$N_{n,i}$, кН	$\gamma_{t,i}$	$t_{cr,i}$, °C	$t_{пр,i}$, мм	$P_{ф,i}$, М
Верхний сжатый пояс	300	321,07	22,36	305,78	0,558	504,48	4,7	28,0
Нижний растянутый пояс	300	331,81	22,36	316,01	0,577	496,12	4,7	28,0
Раскосы растянутые	229	158,99	21,63	151,42	0,286	624,16	5,4	23,0
Раскосы сжатые	236	154,76	21,63	147,39	0,278	627,68	5,4	23,0

Таблица 3. Данные определения предела огнестойкости сжатых элементов стропильной фермы по потере устойчивости

Элементы стальной фермы	Исходные данные				Результаты расчета			
	l_i , см	$N_{n,i}$, кН	$A_{s,i}$, см ²	$\sigma_{n,i}$, МПа	$\lambda_{max,i}$	$\Delta \varepsilon_{n,i}$	$t_{cr,i}$, °C	$P_{\phi,i}$, мин
Верхний сжатый пояс	300	305,78	22,36	136,75	64,38	$17,30 \cdot 10^{-4}$	400,0	32,0
Раскосы сжатые	236	147,39	21,63	68,14	62,27	$22,16 \cdot 10^{-4}$	600,0	24,0

На основании полученных значений делаем вывод о назначении предела огнестойкости для всей конструкции фермы по пределу огнестойкости, соответствующему минимальному значению, то есть $P_{\phi} \approx 23$ мин.

Проведем расчет предела огнестойкости тех же стержней фермы на основании способа, учитывающего термосиловое воздействие на шарнирно-стержневую конструкцию [14].

Исходные данные для расчета представлены выше, в том числе данные по нагрузке: полная нагрузка $q = 3,094 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$; снеговая нагрузка $q_{\text{сн}} = 1,76 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$.

Интегральный коэффициент запаса при расчете огнестойкости определяется рядом показателей, которые необходимо найти, а именно:

- средний коэффициент надежности по нагрузке (γ_f) определяется выражением:

$\gamma_f = \frac{q}{q_n} = \frac{3,094}{2,384} = 1,298 \approx 1,30$, где q, q_n – соответственно, расчетная и нормативная нагрузки на ферму;

- коэффициент надежности по нагрузке (k_c) (без учета снеговой в расчетах огнестойкости конструкции): $k_c = \frac{q}{q - q_{\text{сн}}} = \frac{3,094}{3,094 - 1,76} = 2,32$;

- коэффициент надежности стальных элементов фермы, выполненных из листового проката толщиной от 5 до 6 мм, по степени использования материала (k_y) рассчитан для стержней, испытывающих максимальные напряжения, при этом значение предела текучести принято в расчете не по СП 16.13330-2017 [15] $R_y = 245$ МПа, а в соответствии с ранее принятым при расчете в RSA $R_y = 250$ МПа:

- для верхнего пояса из стали С255: $k_y = \frac{R_y}{\sigma} = \frac{250}{139,60} = 1,79$;

- для нижнего пояса из стали С255: $k_y = \frac{R_y}{\sigma} = \frac{250}{144,26} = 1,73$;

- для растянутых раскосов (15, 23) из стали С255: $k_y = \frac{R_y}{\sigma} = \frac{250}{70,48} = 3,55$;

- для сжатых раскосов (14, 22) из стали С255: $k_y = \frac{R_y}{\sigma} = \frac{250}{68,60} = 3,64$.

- коэффициент запаса несущей способности по нормативному сопротивлению стали (k_R): $k_R = \frac{R_u}{R_S} = \frac{245}{235} = 1,04$, где R_u, R_S – соответственно, временное и расчетное сопротивление стали, МПа;

- коэффициент надежности по ответственности здания $\gamma_n = 1,0$ [16];

- показатель запаса несущей способности сжатого элемента от жесткости закрепления его концов (k_3): $k_3 = \frac{1}{\mu^{0,5}} = 1,0$, где $\mu = 1,0$ - при шарнирном закреплении обоих концов сжатого элемента [15].

- коэффициенты продольного изгиба (φ) определяем интерполированием справочных данных [17]: $\varphi_{\text{вп}} = 0,759$; $\varphi_{14,22} = 0,772$, при известной гибкости стержней и расчетного сопротивления стали равным 250 МПа; гибкость элементов: стержней верхнего пояса $\lambda_{\text{вп}} = \frac{l_0}{i_x} = \frac{1 \cdot 3,0 \cdot 100}{4,66} = 64,38$; максимально нагруженных сжатых раскосов:

$$\lambda_{14,22} = \frac{l_0}{i_x} = \frac{1 \cdot 2,36 \cdot 100}{3,79} = 62,27.$$

- интегральный коэффициент запаса при расчете огнестойкости:

- для верхнего сжатого пояса фермы равен:

$$K_0 = \gamma_f \cdot k_c \cdot k_y \cdot k_R \cdot \gamma_n \cdot k_3 \cdot \varphi_{\text{вп}} = 1,30 \cdot 2,32 \cdot 1,79 \cdot 1,04 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,759 = 4,261,$$

а интенсивность силовых напряжений ($J_{\sigma s}$) в сечении сжатого элемента равна:

$$J_{\sigma s} = \frac{1}{K_0} = \frac{1}{4,261} = 0,234.$$

- для нижнего растянутого пояса фермы равен:

$$K_0 = \gamma_f \cdot k_c \cdot k_y \cdot k_R \cdot \gamma_n = 1,30 \cdot 2,32 \cdot 1,73 \cdot 1,04 \cdot 1,0 = 5,614, \text{ интенсивность силовых}$$

напряжений в сечении растянутого элемента равна: $J_{\sigma s} = \frac{1}{K_0} = \frac{1}{5,614} = 0,178.$

- для растянутых раскосов фермы:

$$K_0 = \gamma_f \cdot k_c \cdot k_y \cdot k_R \cdot \gamma_n = 1,30 \cdot 2,32 \cdot 3,55 \cdot 1,04 \cdot 1,0 = 11,135, \text{ интенсивность силовых}$$

напряжений в сечении растянутого элемента равна: $J_{\sigma s} = \frac{1}{K_0} = \frac{1}{11,135} = 0,090.$

- для сжатых раскосов фермы:

$$K_0 = \gamma_f \cdot k_c \cdot k_y \cdot k_R \cdot \gamma_n \cdot k_3 \cdot \varphi_{14,22} = 1,30 \cdot 2,32 \cdot 3,64 \cdot 1,04 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,772 = 8,814,$$

интенсивность силовых напряжений в сечении растянутого элемента равна:

$$J_{\sigma s} = \frac{1}{K_0} = \frac{1}{8,814} = 0,113.$$

Далее определяется время сопротивления термосиловому воздействию элементов стропильной стальной фермы:

- верхний пояс фермы: сечение $120 \times 120 \times 5$ (мм); $A_s = 22,36$ (см²); периметр 4-х стороннего обогрева сечения: $P = 2 \cdot (12 + 12) = 48$ (см); приведенная толщина металла $t_{\text{пр}} = \frac{A_s}{P} = \frac{22,36}{48} = 0,466$ (см) = 4,7 (мм); время сопротивления термосиловому воздействию стержня верхнего пояса фермы равно:

$$\tau_{us} = 0,6 \cdot t_{\text{пр}} + 110 \cdot (\sqrt{(1 - J_{\sigma s})} - 0,5) = 0,6 \cdot 4,7 + 110 \cdot (\sqrt{(1 - 0,234)} - 0,5) = 47,97 = 44,09 \text{ (мин)}$$

- нижний пояс фермы: сечение $120 \times 120 \times 5$ (мм); $A_s = 22,36$ (см²); периметр 4-х стороннего обогрева сечения: $P = 2 \cdot (12 + 12) = 48$ (см); приведенная толщина металла

$t_{пр} = \frac{A_s}{P} = \frac{22,36}{48} = 0,466 \text{ см} = 4,7 \text{ мм}$; время сопротивления термосиловому воздействию стержня нижнего пояса фермы равно:

$$\tau_{us} = 0,6 \cdot t_{пр} + 110 \cdot (\sqrt{(1 - J_{\sigma s})} - 0,5) = 0,6 \cdot 4,7 + 110 \cdot (\sqrt{(1 - 0,178)} - 0,5) = 47,6 \text{ (мин)}.$$

- раскосы растянутые: сечение $100 \times 100 \times 6$ (мм); $A_s = 21,63$ (см²); периметр 4-х стороннего обогрева сечения: $P = 2 \cdot (10 + 10) = 40$ (см); приведенная толщина металла $t_{пр} = \frac{A_s}{P} = \frac{21,63}{40} = 0,541$ (см) = 5,4 (мм); время сопротивления термосиловому воздействию растянутого раскоса фермы равно:

$$\tau_{us} = 0,6 \cdot t_{пр} + 110 \cdot (\sqrt{(1 - J_{\sigma s})} - 0,5) = 0,6 \cdot 5,4 + 110 \cdot (\sqrt{(1 - 0,09)} - 0,5) = 53,2 \text{ (мин)}.$$

- раскосы сжатые: сечение $100 \times 100 \times 6$ (мм); $A_s = 21,63$ (см²); периметр 4-х стороннего обогрева сечения: $P = 2 \cdot (10 + 10) = 40$ (см); приведенная толщина металла $t_{пр} = \frac{A_s}{P} = \frac{21,63}{40} = 0,541$ (см) = 5,4 (мм); время сопротивления термосиловому воздействию сжатого стержня фермы равно:

$$\tau_{us} = 0,6 \cdot t_{пр} + 110 \cdot (\sqrt{(1 - J_{\sigma s})} - 0,5) = 0,6 \cdot 5,4 + 110 \cdot (\sqrt{(1 - 0,113)} - 0,5) = 51,83 \text{ (мин)}.$$

Результаты расчета времени сопротивления термосиловому воздействию элементов стропильной стальной фермы и пределы огнестойкости, рассчитанные двумя способами (табл. 4) существенно отличаются.

Минимальное время, которое может воспринимать стальная ферма до потери ею несущей способности, соответственно, полученные 1-м и 2-м способами, составляют 23 и 44 минуты. Поскольку 2-й способ оценки огнестойкости фермы [14] учитывает комплекс показателей, влияющих на огнестойкость конструкции, и основан на сопоставлении полученных результатов с испытаниями аналогичных конструкций здания, то по мнению автора статьи, следует принять для оценки огнестойкости конструкции значения, соответствующие времени сопротивления элементов фермы термосиловому воздействию.

Анализ полученных значений ставит, как минимум, два вопроса:

- какое из полученных значений считать пределом огнестойкости фермы;
- какому нормируемому показателю из известных значений [4, 7], оно должно соответствовать.

Значения пределов огнестойкости строительных конструкций (несущие стены, колонны и другие несущие элементы), приведенные в таблице 21 «Технического регламента» (ФЗ -123) [4], отличаются от требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций бесчердачных покрытий, к которым и относится исследуемая конструкция стропильной фермы.

Таблица 4. Результаты расчетов пределов огнестойкости элементов стальной фермы

Элементы стальной фермы	1-й способ расчета		2-й способ расчета		
	$P_{\phi, i}$, мин.		$t_{пр, i}$, мм	$J_{\sigma s, i}$	$\tau_{us, i} (P_{\phi, i})$, мин.
	по прочности	по устойчивости			
Верхний сжатый пояс	28,0	32,0	4,7	0,171	44,1
Нижний растянутый пояс	28,0	-	4,7	0,178	47,6
Раскосы растянутые	23,0	-	5,4	0,090	53,2
Раскосы сжатые	23,0	24,0	5,4	0,083	51,8

В нашем примере для проектируемого здания II степени огнестойкости предел огнестойкости стропильной фермы, как конструкции с бесчердачным покрытием, следует принимать равным R15. С другой стороны, стропильная ферма является несущей конструкцией, для которой в той же таблице 21 ФЗ-123 нормируемое значение предела огнестойкости соответствует R90.

Во-первых, следует согласиться с доводами, приведенными в статье «Нормирование огнестойкости и идентификация строительных конструкций» (авт.: Кузнецова И.С., Гравит М.В., Зимин С.С., Сердобинцев Р.М.) [8], о том, что при жёстких сопряжениях элементов пространственного стального каркаса обрушение одного или нескольких его элементов может привести к нарушению его пространственной жёсткости, устойчивости и разрушению здания в целом. Из чего следует, что предел огнестойкости всей фермы необходимо принимать по минимальному значению P_{ϕ} элементов фермы, каждый из которых в равной степени ответственен за устойчивость конструкции в целом.

Во-вторых, в проектируемом стальном пространственном каркасе складского корпуса весь объем здания сосредоточен в едином одноэтажном пространстве, образованном системой колонн и ферм (подстропильных и стропильных), а также прогонов и связей (вертикальных и горизонтальных). Потеря несущей способности и устойчивости одной или нескольких ферм, может привести к разрушению всего пространственного каркаса. Поэтому при оценке огнестойкости стальной стропильной фермы, как, впрочем, и других несущих элементов каркаса, нельзя ограничиваться минимальным пределом огнестойкости R15.

Кроме того, согласно 5.4.2 СП 2.13130.2020 [7], п. 3 в СП 13–102–2003 [19], с п. 9.3 СП 160.1325800.2014 [20] к несущим элементам зданий следует относить несущие стены, колонны, а также связи, диафрагмы жесткости, фермы, элементы перекрытий и бесчердачных покрытий (балки, ригели, плиты, настилы), если они обеспечивают общую прочность, пространственную устойчивость и геометрическую неизменяемость здания при пожаре.

Следовательно, анализируя полученные двумя способами значения пределов огнестойкости отдельных элементов фермы (табл. 4), можно сказать, что ни один элемент (стержень) стропильной фермы, выполненный в виде коробчатого сечения из стали С255 с представленными выше геометрическими параметрами не соответствует нормируемому пределу огнестойкости R90.

Из чего следует необходимость проектирования огнезащиты элементов фермы известными современными средствами.

Литература

1. Пронин, Д.Г. Огнестойкость стальных несущих конструкций : Пособие / Ассоциация развития стального строительства / Д.Г. Пронин Д.Г. – Москва : АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ГРАФИКС ЮНИОН», 2015. – 52 с. : ил. ISBN 978-5-9907551-1-6
2. Митрофанов, С.Г. Огнестойкость металлических конструкций промышленного здания при различных очагах возгорания / С.Г. Митрофанов. – Текст : электронный // Строительство и техногенная безопасность. № 8(6). – Симферополь: Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, 2017. – С. 61-65. – URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_32287628_37620675.pdf (дата обращения: 12.03.2021).
3. Кузнецова, И.С., Гравит, М.В., Зимин, С.С., Сердобинцев, Р.М. Нормирование огнестойкости и идентификация строительных конструкций / И.С. Кузнецова, М.В. Гравит, С.С. Зимин, Р.М. Сердобинцев. – Текст : электронный // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. № 4. – Москва: АГПС Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2019. – С. 28-38. – URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_41857906_48712747.pdf (дата обращения: 12.03.2021).
4. Федеральный закон "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" от 22.07.2008 N 123-ФЗ (последняя редакция) (ред. от 30.04.2021) «Технический регламент

о требованиях пожарной безопасности» : [принят Государственной думой 4 июля 2008 года : одобрен Советом Федерации 11 июля 2008 года]. – Документ предоставлен КонсультантПлюс. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/6e24082b0e98e57a0d005f9c20016b1393e16380/ (дата обращения: 09.06.2021). Текст : электронный.

5. ГОСТ 30247.0-94 (ИСО 834-75). Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования. – М.: МНТКС, 1994. – 11 с. - URL: <http://gostbank.metaltorg.ru/data/24.pdf> (дата обращения: 12.03.2021). Текст : электронный.

6. ГОСТ 30247.1-94 (ИСО 834-75). Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции. – М.: МНТКС, 1994. – 11 с. - URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/278/27885.pdf> (дата обращения: 12.03.2021). Текст : электронный.

7. СП 2.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты. Дата введения 2020-09-12/ разработан ФГБУ ВНИИПО МЧС России. - М.: Стандартинформ, 2020. – 43 с. - URL: <http://docs.cntd.ru/document/565248963> (дата обращения: 12.03.2021). Текст : электронный.

8. Рекунов, С.Н. Пределы огнестойкости строительных конструкций и огнезащитная эффективность материалов. – Электронный ресурс. – URL: https://prozask.ru/d/snrekunov-predely_ognestoykosti_i_ognezashchitnaya_effektivnost.pdf (дата обращения: 12.03.2021).

9. Ильин, Н.А. Техническая экспертиза зданий, поврежденных пожаром / Н.А. Ильин. - М.: Стройиздат, 1983. – 200 с.

10. Бушев, В.П. Огнестойкость зданий / В.П. Бушев, В.А. Пчелинцев, В.С.Федоренко, А.Я. Яковлев. – М.: Стройиздат, 1970. – 264 с.

11. Барина, Е.Л., Приступок, Д.Н., Сивенков, А.Б., Фролов А.Ю., Шевкуненко Ю.Г. : методические указания к выполнению контрольных работ и упражнений по дисциплине «Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре» для слушателей очного и заочного обучения. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2010. – 119 с.

12. Кошелев, А.Ю. Расчет пределов огнестойкости стальных строительных конструкций : учебное пособие / Ю. Кошелев, А. В. Кондрашин, Э. А. Ожегов, В. В. Смирнов, С. Н. Терехин, С. В. Шархун, Г. Л. Шидловский; под общей ред. О.А. Мокроусовой. – Текст : электронный. – Екатеринбург: РИО Уральского института ГПС МЧС России, 2017. – 86 с. - URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_32526883_46375405.pdf

13. Мосалков, И.Л. Огнестойкость строительных конструкций / И.Л. Мосалков, Г.Ф. Плюснина, А.Ю. Фролов. – Москва: ЗАО «Спецтехника», 2001. – 496 с.: ил. ISBN 5-901018-13-3.

14. Способ оценки огнестойкости стальной фермы здания. Патент № 2604478. Бюл. № 34 от 10.12.2016 г. – Текст электронный. - URL: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet

15. ГОСТ 27772-2015. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия (с Поправками, с Изменением N 1). Дата введения 2016-09-01. – М.: АО «Кодекс», 1994. – 11 с. - URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200133727> (дата обращения: 12.03.2021). Текст : электронный.

16. СП 16.13130.2017. Стальные конструкции (с Изменением N 1). Дата введения 2017-08-28 / разработан АО "НИЦ "Строительство" - ЦНИИСК им.В.А.Кучеренко, МГСУ, СПбГАСУ. - М.: Стандартинформ, 2017. – 148 с. - URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293745/4293745484.pdf> (дата обращения: 12.03.2021). Текст : электронный.

17. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения (Переиздание). Дата введения 2015-07-01. – М.: Стандартинформ, 2015. – 16 с. - URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200115736>. (дата обращения: 12.03.2021). Текст : электронный.

18. Руководство по подбору сечений элементов строительных стальных конструкций. Часть 1. Дата актуализации: 01.01.2021. – М.: ЦНИИПРОЕКТСТАЛЬКОНСТРУКЦИЯ им. Мельникова,

1991 – 65 с. - URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293841/4293841491.pdf> (дата обращения: 12.03.2021). Текст : электронный.

19. СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. Дата введения 2003-08-21 / разработан ФГУП "КТБ ЖБ", ГУП "НИИЖБ", ГУП "ЦНИИСК им.В.А.Кучеренко", ГУП "НИИ Мосстроя". - М.: ФГУП ЦПП, 2003. – 31 с. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294816/4294816189.pdf> (дата обращения: 12.03.2021). Текст : электронный.

20. СП 160.1325800.2014 Здания и комплексы многофункциональные. Правила проектирования (с Изменением N 1). Дата введения 2014-09-01/ разработан Открытое акционерное общество "Центральный научно-исследовательский и проектный институт жилых и общественных зданий". - М.: ООО «Аналитик», 2014. – 26 с. – URL: <https://aimos.ru/resources/documents/SP.pdf> (дата обращения: 12.03.2021). Текст : электронный.